

АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГРАВИТАЦИОННУЮ БУРОВУЮ ПЛАТФОРМУ

Ю.Г. Жемойдо

ЦКБ «Коралл», г. Севастополь, ул. Репина, 1

С.В. Железняк

Севастопольский государственный технический университет, г. Севастополь,
бухта Стрелецкая, Студгородок

В.М. Кушнир

Морской гидрофизический институт

НАН Украины,

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail:kushnir@alpha.mhi.iuf.net

Выполнен анализ воздействия штормовых волн на гравитационную буровую платформу. Вычислены ударные нагрузки для средних высот волн, а также высот волн с 1% и 0,1% обеспеченностью.

Целью настоящей работы является анализ и оценки параметров волновых воздействий на гравитационную буровую платформу "Нерпа", которая была спроектирована в ЦКБ "Коралл" для работ в районе Приразломного нефтяного месторождения (ПНМ). Это месторождение находится в Печерском море - обширном мелководном районе, находящемся в устье реки Печора, в юго-восточной части Баренцева моря, южнее Новой Земли. Печерское море открыто для северо-западных ветров и штормовых волн, которые приходят из центральной части Баренцева моря и могут достигать 8-10 метровой высоты.

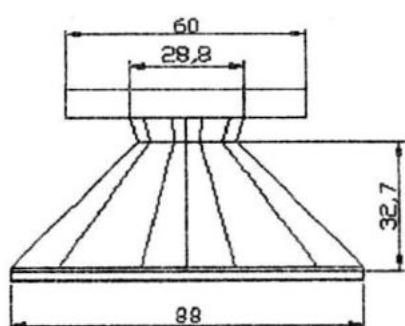


Рис.1. Форма и основные размеры ледостойкой буровой платформы "Нерпа"

Буровая платформа "Нерпа" имеет форму конического многогранного конуса (Рис.1), что обеспечивает устойчивость этой конструкции при натиске дрейфующих льдов, толщина которых может достигать 2...2.5 м.

Геометрическая форма буровой платформы оказывает определенное влияние на структуру

ветровых волн. Это влияние проявляется в уменьшении их длин и периодов, а также в увеличении крутизны и высоты при набегании на платформу. В месте разрушения штормовых волн, они могут оказывать значительное давление на стеки конструкции. Указанные эффекты важно учитывать при проектировании и эксплуатации ледостойких платформ, имеющих коническую форму.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Прямые измерения характеристик поверхностных волн в Печерском море крайне немногочисленны и недостаточны для определения статистических характеристик экстремального волнения при штормовых условиях. В связи с этим, для определения таких характеристик использована спектрально-параметрическая модель ветрового волнения [1]. Эта модель предварительно была многократно верифицирована по данным измерения волнения на Балтийском, Черном, Баренцевом и Охотском морях.

В июле 1984 года в юго-восточном районе Баренцева моря, достаточно близко от ПНМ, экспедицией ЛО ГОИН производились измерения ветра и волнения на судне "Ромбак". В один из периодов проведения этих работ в районе $69^{\circ} 30' \text{ с.ш.}, 53^{\circ} 08' \text{ в.д.}$ возникли синоптические условия для развития штормового волнения. Для данного случая было выполнено сопоставления вычисленных с использованием спектрально-параметрической модели высот волн с данными непосредственных измерений. Эти сопоставления показали, что средняя погрешность расчетов составила 0.139 м, а коэффициент корреляции между временным ходом вычисленных и измеренных величин высот волн был равен 0.95. Это свидетельствуют о возможности относительно точных модельных расчетов параметров ветровых волн на основе имеющихся архивных данных метеорологических параметров для условий Печерского моря.

Расчеты приводного ветра и волнения в районе ПНМ производились с использованием спектрально-параметрической модели с архивным данным приземного атмосферного давления за период 35 лет. Средние значения высот волн были приведены к максимальным высотам 0,1% обеспеченности в соответствии с имеющимися стандартными методиками [2]. По результатам расчетов было выделено 5 случаев, когда максимальная высота волн превысила 8 м. Полученный ряд максимальных высот волн был использован для вычис-

ления эмпирического распределения плотности вероятностей $W_e(h)$ по градациям через 0,5 м. Эта зависимость показана на Рис.2.

W_e

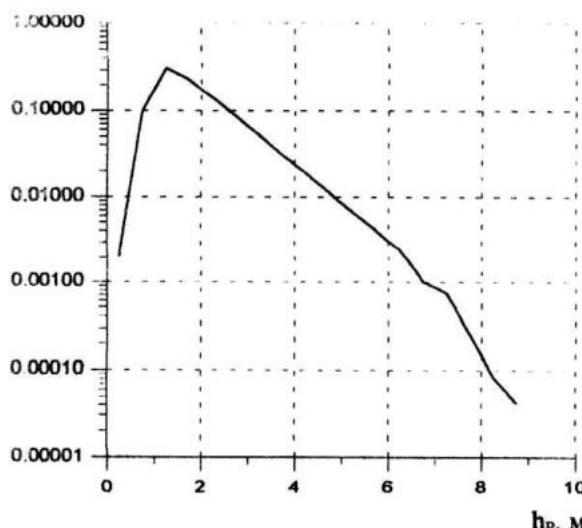


Рис.2. Плотность распределения вероятностей экстремальных высот волн в районе ПНМ.

Особенностью этого распределения является его существенное отличие от нормального закона. Выполненные оценки показали, что среднее значение высоты волны равно 1.93 м, стандартное отклонение 0.99 м, коэффициенты асимметрии и эксцесса равны соответственно 1.64 и 3.13.

Глубины моря в районе ПНМ изменяются от 10 до 20 м. Скорость штормового ветра может достигать значительных величин, до 35...37 м/с. Используя приближение мелкой воды, определим возможные величины средних высот волн h_o , их длин λ_o и периодов T_o по следующим соотношениям модели ЛОГОИН-Союзменипроект [3].

$$\frac{gh_o}{W^2} = 0.07 \left(\frac{gH}{W^2} \right)^{0.6},$$

$$\frac{gT_o}{W} = 18.7 \left(\frac{gh_o}{W^2} \right)^{0.6}, \quad \lambda_o = T_o \sqrt{gH} \quad (1)$$

где W -скорость ветра, м/с; g -ускорение свободного падения, 9.81 м/с²; H -глубина моря, м.

Ниже в Таблице 1 приведены результаты расчетов средних значений высот, периодов и длин волн при различной скорости штормового ветра и глубинах моря.

Из Таблицы 1 следует, что при средней глубине района ПНМ 15 м, среднему значению высоты волны 2 м соответствует скорость ветра, равная 27...28 м/с, что отвечает реальным данным, на основе которых было определено вероятностное распределение W_e [4].

Вероятностные распределения высот, периодов и длин волн соответствуют распределению Вейбулла

$$F(z) = \exp[-A(z/z_o)^k],$$

$$A = I^{-k} (I + k^{-1}),$$

где $k=2, 2.3, 3$ соответственно для высот, длин и периодов волн; $A = 0.785, 0.757, 0.712$ для этих же параметров.

В реальных условиях существует взаимосвязь между высотой, периодом и длиной волны. Используя соотношения (1), такую взаимосвязь между средними значениями можно записать следующим образом.

$$T_o = 7.502 h_o^{0.6} W^{-0.2},$$

$$\lambda_o = 23.50 H^{0.5} h_o^{0.6} W^{-0.2} \quad (2)$$

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С БУРОВОЙ ПЛАТФОРМОЙ

При набегании штормовых волн на наклонные стенки платформы, их длина уменьшается, а высота увеличивается. Разрушение волны происходит при достижении определенных критических условий ($7h = \lambda$) и при этом основная энергия волны расходуется на формирование ударной нагрузки на стеки платформы. В этой же зоне формируется экстремум волнового давления.

Таблица 1

Параметры ветровых волн в районе ПНМ

W, м/с	H, м 10			15			20		
	h _o , м	T _o , с	λ _o , м	h _o , м	T _o , с	λ _o , м	h _o , м	T _o , с	λ _o , м
20	1.23	4.66	46.2	1.57	5.39	65.4	1.86	5.98	83.8
25	1.47	4.96	49.2	1.87	5.74	69.7	2.23	6.37	89.2
30	1.70	5.22	51.7	2.17	6.04	73.3	2.57	6.70	93.9
35	1.92	5.45	54.0	2.45	6.31	76.5	2.91	7.00	98.0
40	2.14	5.66	56.1	2.73	6.55	79.4	3.24	7.62	101.7

Известно множество моделей трансформации ветровых волн при их взаимодействии с наклонными поверхностями [5]. Экспериментальные исследования показали, что наилучшее согласие с экспериментальными данными дает соотношение

$$h_p = 0.54 h_n (\lambda_n / H_p)^{0.25}, \quad (3)$$

где h_p , H_p - соответственно изменяющиеся высота волны и глубина наклонного основания платформы, h_n , λ_n - высота и длина волны при их подходе к основанию платформы.

Используя (2), соотношение (3) можно записать в следующем виде.

$$\begin{aligned} h_p &= 1.19 H^{0.125} W^{-0.05} h_n^{1.15} H_p^{-0.25} = \\ &= P_h H_p^{-0.25} h_n^{1.15} \end{aligned} \quad (4)$$

Как это было отмечено, вероятностное распределение высот волн h_n соответствует распределению Вейбулла (Релея). Для вычисления плотности вероятностного распределения высоты волны h_p использованы общие правила преобразования не линейно связанных случайных величин. Опуская связанные с этим преобразования, находим:

$$\begin{aligned} W(h_p, H_p) &= \frac{0.683}{h_o^2} \frac{H_p^{0.435} h_p^{0.74}}{P_h^{1.74}} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{0.785 H_p^{0.435} h_p^{1.74}}{h_o^2 P_h^{1.74}}\right), \\ P_h &= 1.19 H^{0.125} W^{-0.05}. \end{aligned} \quad (5)$$

На Рис.3 приведены плотности распределения вероятностей высоты волны при различных величинах глубины стенки платформы ($H_p = 5, 10, 15$ м), глубине моря 15 м и скорости ветра 30 м/с.

Плотность распределения вероятностей при глубине 15 м близка к эмпирической плотности распределения вероятностей W_e (Рис.2) и это свидетельствует о достоверности вычисленных вероятностных характеристик. Их основной особенностью является увеличение вероятности больших высот волн при уменьшении глубины, так вероятность волн высотой 8...8.5 м при глубине 5 м примерно на полтора порядка больше вероятности волн такой же высоты на глубине 15 м.

Выше было отмечено, что плотность распределения вероятностей длин волн λ_n соответствует распределению Вейбулла следующего вида:

$$\begin{aligned} W(\lambda_n) &= \frac{1.741}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_0}\right)^{1.3} \times \\ &\times \exp\left[-0.757 \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_0}\right)^{2.3}\right], \end{aligned} \quad (6)$$

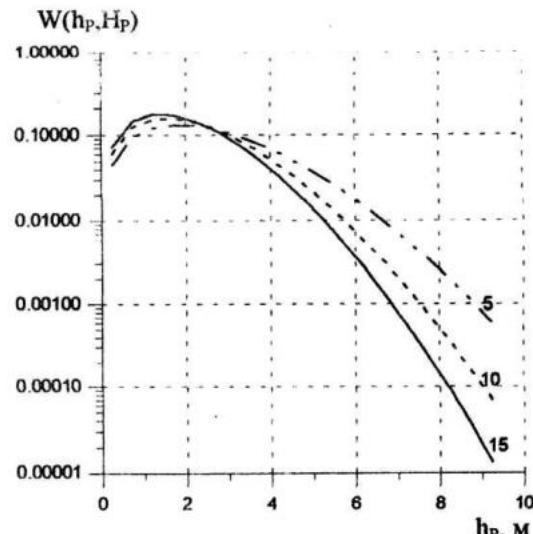


Рис.3. Плотность распределения вероятностей высоты волны при глубинах на склонной стенки платформы 5, 10 и 15 м.

В формуле (6) λ_0 - среднее значение длины волны.

Экспериментальные исследования [5] показали, что при набегании волн на наклонную поверхность ее длина λ_p уменьшается в соответствии с соотношением:

$$\lambda_p = 1.6 \lambda_n^{0.667} H_p^{0.333}, \quad (7)$$

где H_p - глубина наклонного основания.

Используя правила нелинейного преобразования случайных величин, выражение для плотности распределения вероятностей длины волны, которая набегает на платформу, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} W(\lambda_p, H_p) &= 0.52 \lambda_0^{-2.3} H_p^{-1.15} \lambda_p^{2.45} \times \\ &\times \exp(-0.15 \lambda_0^{-2.3} H_p^{-1.15} \lambda_p^{3.45}) \end{aligned} \quad (8)$$

На Рис.4 приведены графики $W(\lambda_p, H_p)$ для глубин 5, 10 и 15 м и при скорости ветра 30 м/с ($\lambda_0 = 73.3$ м). На этих зависимостях отчетливо проявляется уменьшение длины волны при уменьшении глубины основания платформы.

Так, при глубине 15 м средняя длина волны равна 67.5 м, при глубине 10 м - 58.9 м и при глубине 5 м - 47.8 м. При уменьшении глубины наблюдается также некоторое уменьшение дисперсии длин волн.

Выполненный анализ показал, что средняя длина волн, длина волн 1% и 0.1% обеспеченности зависят от глубины стенки платформы следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 28.834 H^{0.3127}, \lambda_{1\%} = 48.232 H^{0.3162}, \\ \lambda_{0.1\%} &= 52.509 H^{0.368} \end{aligned}$$

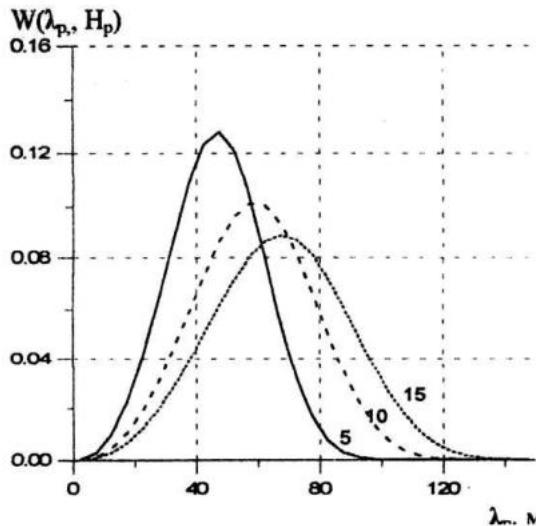


Рис.4. Графики плотности распределения вероятностей длин волн при их набегании на платформу при глубинах на клонного основания 5, 10 и 15 м.

РАЗРУШЕНИЕ ВОЛН И УДАРНЫЕ НАГРУЗКИ НА ПЛАТФОРМУ

При продвижении волн в сторону убывающих глубин они теряют устойчивую форму периодического движения и разрушаются, превращаясь в наиболее опасную "разбитую" или "прибойную" волну. Глубина от спокойного горизонта до поверхности стенки платформы, где волна разрушается, называется критической глубиной H_k . Существует большое количество моделей разрушения поверхностных волн при уменьшении глубины [6]. Наиболее приемлемой теорией обрушения крутых волн является теория Митчела-Хавелона, основанная на предельном профиле волны, который определяется из условия $7h_k = \lambda_k$, где h_k , λ_k - критические величины высоты и длины волны. Эта зависимость находится в хорошем соответствии с данными лабораторных экспериментов [5].

Выше были приведены соотношения (3), (7) между высотой и длиной волны при изменяющейся глубине основания платформы H_p . Используя их, а также приведенное условие разрушения волны, находим:

$$H_k = 4.368 h_n^{1.714} \lambda_n^{-0.714}. \quad (9)$$

Так как высота волны связана с ее длиной ($\lambda_n = 23.5 H_p^{0.5} h_n^{0.6} W^{-0.2}$), величину H_k можно выразить через высоту волны следующим образом:

$$H_k = 0.4578 H^{-0.357} W^{0.143} h_n^{1.285} = P_k h_n^{1.286}, \quad (10)$$

где H - глубина моря.

Плотность распределения вероятностей высот волн, как это уже отмечалось, соответствует распределению Релея:

$$W(h_n) = 1.57 h_0^{-2} h_n \exp(-0.785 h_0^{-2} h_n^2)$$

Используя правила нелинейных преобразований случайных величин $H_k = f(h_n)$, находим:

$$W(H_k) = \frac{1.22}{h_0^2} \frac{H_k^{0.555}}{P_k^{1.555}} \times \exp\left(-\frac{0.785}{h_0^2} \frac{H_k^{1.555}}{P_k^{1.555}}\right) \quad (11)$$

Эта зависимость представлена на рис.5.

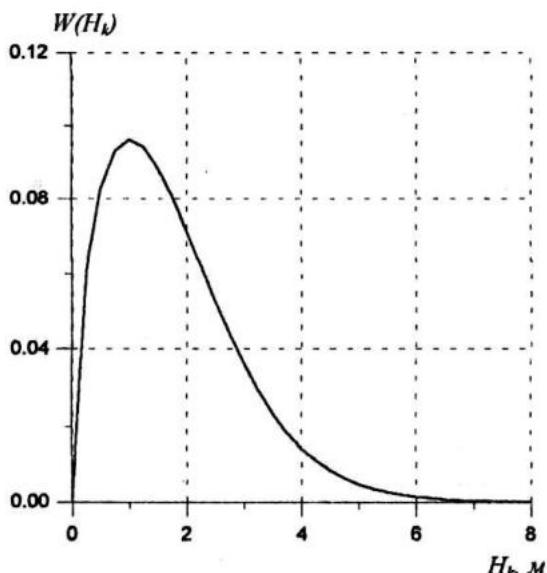


Рис.5. Плотность распределения вероятностей глубины разрушения волны на стенке платформы.

Плотность распределения вероятностей глубины разрушения волны при ее продвижении по стенке платформы является несимметричной, среднее значение равно 1.76 м.

Волновое давление на стенки платформы пропорционально квадрату орбитальной скорости разрушающейся волны и ее высоте. Максимальное давление в точке разрушения волны равно [6]:

$$p_w = k_s k_r p_{rw} \rho g h, \quad (12)$$

где

$$k_s = 0.85 + 4.8 \cdot \frac{h}{\lambda_0} + \operatorname{ctg}(0.028 - 1.15 \cdot \frac{h}{\lambda_0})$$

h - высота критической волны, равная $\lambda_0/7$, $\operatorname{ctg} \varphi = 1$ (см. рис.1); $k_r = 1.4$, k_r -коэффициент, зависящий от пологости волны.

При $h = \lambda_0/7$, $k_r = 1$, p_{rw} - максимальное относительное волновое давление в точке разрушения.

шения волн. Эта величина определяется высотой волны и ее можно представить как $\rho_{rel} = 2,7766 \cdot h^{-0,3829}$, ρ -плотность воды (1020 кг/м³), g-ускорение свободного падения (9.81 м/с²).

При увеличении глубины квадрат волновой скорости и, следовательно, волновое давление, уменьшается пропорционально величине $exp(-4\pi\Delta H/\lambda)$, где $\Delta H = H - H_k$ [8].

Высота наката разбивающихся волн определяется по соотношению [7]:

$$h_r = k_r k_p k_{sp} k_{run} h_{1\%}, \quad (13)$$

где k_r и k_p - коэффициенты шероховатости и проницаемости стенки платформы. При использовании железобетонных плит $k_r=1$, $k_p=0,9$, k_{sp} -коэффициент, зависящий от скорости ветра W. При $W>20$ м/с, $k_{sp}=1,6$, k_{run} -коэффициент, зависящий от пологости волны. При $\lambda=7h$ $k_{run}=0,47$. Высота волны 1% обеспеченности определяется при использовании релеевского распределения вероятностей высот волн и равна $h_{1\%}=2,42 h_0$. Получаем:

$$h_r = 1 \cdot 0,9 \cdot 1,6 \cdot 0,47 \cdot 2,42 \cdot h_0 = 1,638 h_0$$

Волновая нагрузка на платформу равна:

$$F = PS, \text{ где } P = \frac{I}{H+h_r} \int_0^{H+h_r} P(z) dz; \\ S = 60(H+h_r)/\cos 45 = 1557 \text{ м}^2. \quad (14)$$

Эпюра распределения волнового давления $P(z)$ на поверхность платформы для средних высот волн приведена на рис.6.

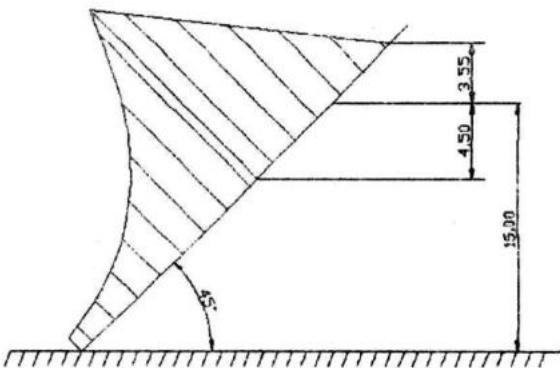


Рис.6. Эпюра волнового давления на стеки платформы

Приведенные выше соотношения были использованы для расчетов волновых нагрузок на платформу для средних высот волн, высот волн 1% обеспеченности и 0.1% обеспеченности. Основные расчетные параметры и результаты вычислений представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Расчетные параметры волновых нагрузок

Характеристики	средние	1% обеспеченности	0.1% обеспеченности
Критическая высота волны, м	2.03	5.86	7.52
ρ_{rel}	2.11	1.41	1.28
Длина волны, м	54.56	94.75	113.272
Максимальное давление, кПа	60.22	115.75	135.13
Нагрузка, кН/тс	33451/3345	94917/9492	125813/12581

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидан И.Н., Лавренов И.В., Пасечник Г.А. и др. Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения в морях СССР. Метсарология и гидрология. 1988. 11. с. 81-90.
2. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л. Гидрометеоиздат. 1985. -256 с.
3. Кудрявая К.И., Сериков Е.И., Скрипту нова Л.И. Морские гидрологические прогнозы. Л. Гидрометеоиздат. 1974. -310 с.
4. Лавренов И.В., Боков В.Н., Пасечник Т.А. и др. Оценка экстремальных высот ветровых волн в Печерском море. Навигация и гидро-графия. 5. 1997. с. 85-93
5. Смирнов А.А. Изменение высоты и длины волны на пологих откосах. В кн. Волновые исследования. М. Госстройиздат. 1962. с.37-60.
6. Смирнов А.А. Глубина обрушения волны на пологих откосах. В кн. Волновые исследования. М. Госстройиздат. 1962. с.177-184.
7. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (нагрузки волновые, ледовые и от ударов). М. Госстрой СССР. 1989.-40 с.
8. Шулейкин В.В. Физика моря. М. Изд.АН СССР.1953.-989 с.